

경주 분황사석탑의 풍화훼손도 평가와 보존과학적 진단

이정은 | 이찬희¹ | 이명성

공주대학교 문화재보존과학과

Deterioration Assessment and Conservational Scientific Diagnosis of the Stone Pagoda in the Bunhwangsa temple, Gyeongju, Korea

Yi Jeong-eun | Lee Chan-hee¹ | Lee Myeong-seong

Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

¹Corresponding Author : chanlee@kongju.ac.kr

초록 경주 분황사석탑은 암석을 벽돌 모양으로 다듬어 쌓아올린 모전석탑으로서, 모전석을 이루는 암석은 주로 안산암질암이다. 전석은 부분적으로 모서리 마모와 균열이 발생되어 있으며 다중박리와 박락, 양파껍질과 같은 분해, 구열상 균열 및 압편상 탈락이 진행 중이다. 화강암질암으로 구성된 기단부와 동서남북 방향의 감실 및 인왕상은 지의류와 이끼류에 의한 피복오염이 심하며 부분적으로 암흑색 및 황갈색 이차 수화물에 의한 무기오염물도 관찰된다. 또한 강수의 침입에 의한 상대적 수분 유지시간이 긴 감실이나 북쪽 탑신 부분은 매우 습한 상태이다. 이런 부분에서는 방해석, 석고, 점토광물 등과 같은 수화성 이차광물과 열화물의 결정화에 의해 박리와 박락이 촉진되고 있다. 삼층 옥개석의 경우 탑의 전반적인 불균형으로 인해 부재의 균열 및 이탈이 발생되어 있어 전석의 교체와 보강이 필요하다. 동남쪽 사자상과 동북쪽 사자상은 알칼리 화강암이며, 서남쪽 및 서북쪽 사자상은 압편질 응회암이다. 이 석탑의 총 표면부재수는 9,708개이며 균열된 부재는 11.0%, 압편 탈락 부재는 6.7%이며 이차적 오염물질이 피복된 부재는 전체의 7.0%에 달한다. 이 석탑은 환경변화와 물리적, 화학적 및 생물학적 요인의 표면풍화에 의해 석재 자체의 기능이 저하되어 있으므로 장기적인 모니터링과 함께 종합적인 보존방안을 연구해야 할 것이다.

중심어 : 박리박락, 피복오염, 불균형, 표면풍화, 균열, 압편상 탈락

ABSTRACT The stone pagoda of the Bunhwangsa temple made by piling small brick-shaped stones. The major rock forming stone bricks are andesites with variable genesis. Rock properties of the pagoda roof stone suffer partly including multiple peel-offs, exfoliation, decomposition like onion peels, cracks forming round lines and falling off stone pieces. The stylobates and tabernacles in all the four directions the pagoda are mostly composed of granitic rocks. Those rock properties are heavily contaminated by lichens and mosses with the often marks of inorganic contamination by secondary hydrates that are dark black or yellowish brown. Within the four tabernacles and northern pagoda body situated to relatively high humidity. There are even light gray precipitate looking like stalactites between the northern and western rocks of the body. Their major minerals are calcite, gypsum and clays. The stone lion standing in the southeast and northeast side are alkali granite, while that in the southwest and northwest lithic tuff. Total rock properties of the pagoda are 9,708 pieces, among the all properties, fractured blocks are 11.0%, fall out blocks are 6.7% and covered blocks by precipitates are 7.0%, respectively. The pagoda has highly deteriorated the functions of the rock properties due to physical, chemical and biological weathering, therefore, we suggest that this pagoda has need to do long term monitoring and synthetic conservation researches.

Key Word : exfoliation, peel-off, falling off, crack, weathering, contamination

1. 서론

경주 분황사석탑(국보 제30호)은 경북 경주시 구황동 분황사 경내에 위치한다. 현재 남아있는 신라 석탑 가운데 가장 오래된 것으로, 암석을 벽돌 모양으로 다듬어 쌓아올린 모전석탑이다(Figure 1). 원래 9층이었다는 기록이 있으나 지금은 3층만 남아있다.¹ 이 탑은 넓은 1단의 기단 위에 3층의 탑신을 쌓아올린 모습이다. 기단은 화강암질 암석으로 이루어져 있고, 네 모서리마다 암석으로 조각된 석수가 한 마리씩 앉아 있다. 암회색 안산암 질암을 작게 벽돌모양으로 잘라 쌓아올린 탑신은 거대한 1층 몸돌에 비해 2층부터는 현저하게 줄어드는 모습을 보이고 있다.

1층 탑신에는 네 면마다 문을 만들고, 양쪽에 불교의 법을 수호하는 인왕상을 조각해 놓았다. 옥개석은 아래 윗면 모두 계단 모양의 층을 이루고 있다. 3층 옥개석만 윗면이 네 모서리에서 위쪽으로 등글게 솟은 모양이며, 그 위에 석영반암으로 만든 연꽃장식의 노반이 놓여 있다. 이 탑은 1915년 일본인에 의해 수리된 이후 지금까지 그 모습을 유지하고 있으며, 수리 당시 탑 안에서 사리함과 구슬 등의 많은 유물들이 발견되었다.²

석조문화재를 구성하고 있는 대부분의 암석은 성인형과 암종에 따라 서로 다른 물리적, 화학적 및 생물학적 풍화특성을 보이며 산출상태를 달리한다. 또한 동일 종류의 암석이라도 노출 조건에 따라 다양한 특성을 갖는다.^{3,4,5} 이에 관한 연구는 최근에 많이 이루어지고 있다.^{6,7,8,9,10,11} 우리나라에 분포하는 대부분의 석조문화재는 동일 종류의 암석으로 구성되어 있는 경우가 일반적이

나, 분황사 석탑의 경우는 여러 종류의 암석이 혼용되었다. 이는 분황사 석탑의 구성부재가 우리나라의 다른 석탑에 비하여 풍화와 훼손이 아주 심한 것처럼 보여지는 원인이기도 하다.

이 탑에 대한 역사학적, 고고학적 및 미술사학적 연구는 많이 있으나^{12,13} 부재의 종류와 구조안정성, 암석학적 풍화와 훼손 및 보존방안에 대한 연구는 극히 미진하다. 따라서 이 연구에서는 분황사석탑을 구성하고 있는 안산암과 화강암류 및 기타 혼용된 암석을 대상으로 정밀조사와 풍화훼손도를 상세히 조사하였다(Figure 1B, 1C). 또한 분황사석탑을 이루고 있는 재질의 물리적 및 화학적 변화와 생물학적 영향에 따른 정량적인 풍화훼손도를 평가하였으며, 보존을 위한 과학적 방안을 도출하였다. 이 결과는 정량화를 통해 이와 유사한 석조문화재의 보존연구를 위한 자료로 활용할 것이다.

2. 현황과 산출상태

분황사석탑은 전체적으로 3층으로 이루어져 있으며, 거대한 탑신에 비해 2층부터는 탑신이 현저하게 줄어드는 모습이다. 기단은 아석을 쌓아올린 단층으로 되어 있어 전탑 기단의 통식을 보여 주며, 중앙에는 1층 탑신을 받치기 위하여 화강암으로 한 층을 더 마련하였다. 탑신부는 길이 약 30~45cm, 두께 약 4~9cm의 다양한 안산암질암을 잘라 각층 옥신과 옥개부를 쌓아 올렸기 때문에 외형상 전탑과 유사하다.¹⁴ 그러나 각각의 위치에 사용된 부재를 이루는 암석이 다양하고, 형태 면에서도 일



Figure 1. Field occurrences of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple. General view of the southwestern side (A). Stalactite-like white grey precipitates collected from northern body rocks of the pagoda (B). Photograph shows detail survey in the uppermost roof of the 3rd floor (C).

반적인 전탑과는 구별된다(Figure 1A). 이 모전석탑의 건립 당시, 신라는 기술적으로 벽돌을 구울만한 기술이 없어 결이 일정한 안산암을 이용하여 벽돌모양으로 다듬고 탑을 쌓았던 것으로 추정된다.¹⁵

분황사석탑은 1915년 개축한 이후 3층으로 남아 있으나, 현재 남아 있는 자료와 1989년 문화재관리국에서 조사한 결과에 의하면 7층이거나 9층이었다는 가설이 제기되고 있다. 이는 현재 남아 있는 2층과 3층의 모습과 비교해 보았을 때 비례면에서 7층일 가능성이 있는 것이고, 경내에 남아 있는 모전석의 양으로 보아서는 9층일 가능성이 있다고 판단한 것이다. 문화재관리국에서 제시한 도면에 의하면 7층일 경우 높이 41.6m, 9층일 경우 높이 48.5m에 이르는 매우 거대한 탑이었을 것으로 추정된다.¹⁶

이 탑은 사찰 내에 위치하며, 후면으로는 보광전이 측면으로는 요사채와 화장실 등이 있다. 한편 이 석탑 동북면에는 석탑의 부재로 사용 되었을 것으로 추정되는 암

석들이 산재한다. 이는 개축 이후 남은 부재를 놓은 것으로 여겨지며, 탑의 규모를 예측할 수 있는 중요한 자료이다. 이 탑의 전체적인 사이트 환경은 양호하나 석탑의 주위를 보호할만한 차단 장치가 없어 관광객들에게 완전히 노출이 되어 있다. 탑의 주위는 풍화토로 이루어져 있으며, 관광객들의 빈번한 관람으로 인한 먼지 등의 오염물질에 의한 피해가 심하다.

또한 경내에는 조경을 위한 크고 작은 수목이 탑을 중심으로 분포하고 있으며 수목과 탑 사이의 거리가 매우 좁다. 이러한 수목들은 탑의 일조량을 방해하며 낙엽 등에 의한 오염을 유발할 수 있다. 이 수목에 대하여는 석탑의 보호와 부지 정비 차원에서 여러 차례의 정리가 있었으나, 현재에도 다소의 문제점을 내포하고 있다. 이 탑의 기단부와 지대석에는 지의류를 비롯한 각종 미생물 및 하등식물의 천이가 진행되어 있는 상태이며 탑신과 옥개석에는 엽상 지의류와 고등식물의 식생이 왕성하다(Figure 1B, 1C).

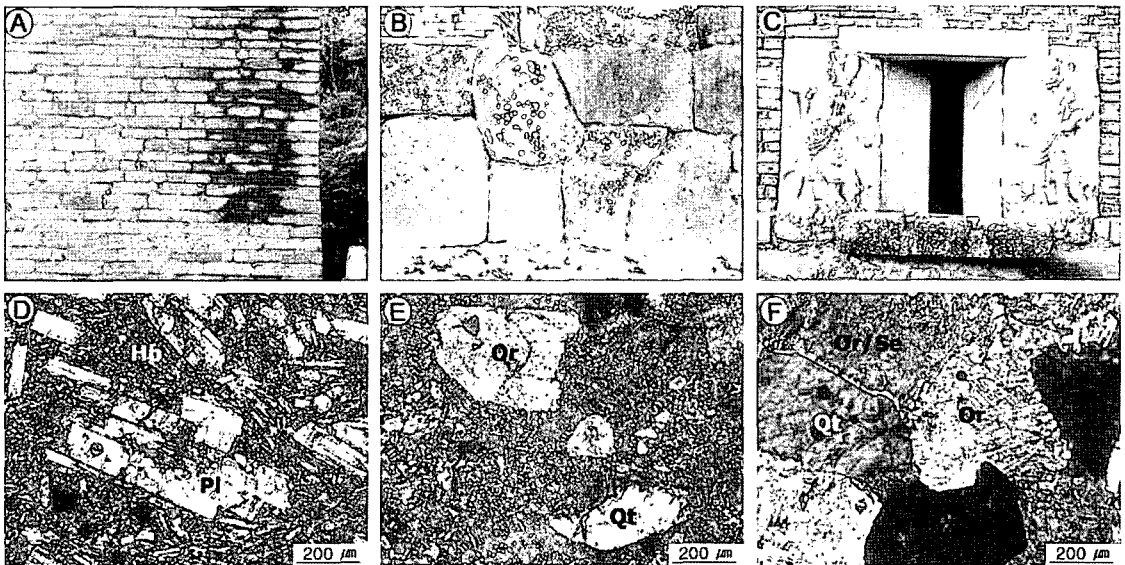


Figure 2. Constituting rocks and microphotographs of host rocks for the stone pagoda in the Bunhwangsa temple. (A) Brick-shaped andesitic pagoda body is highly damaged by leakage of rain water along the fracture systems. (B) Basement rock materials are composed mainly of granitic rocks. (C) Stylobate, tabernacles and stone statues are composed of various granitic rocks. (D) Pilotaxitic textures of plagioclase and chloritized hornblende in andesitic rocks from the pagoda body. (E) Andesitic tuff composed of tuffaceous groundmass and subhedral plagioclase of the pagoda body rock. (F) Quartz, alkali feldspar and biotite assemblage of alkali granite in the pagoda basement rock, which alkali feldspars are highly weathered to sericitic clay minerals.

3. 부재의 재질특성

3.1. 암석학적 특성

분황사가 있는 경주 일대의 지질은 하위로부터 백악기의 안산암질과, 이를 관입한 불국사 화강암류 및 제3기 초의 유문암질 화산쇄설암, 양북층군과 연일층군의 퇴적암류로 구성되어 있다. 또한 상기의 모든 암석들을 부정합으로 피복한 충적층이 분포한다. 이 중에서 불국사 화강암류는 남산, 토함산, 선도산 일대에 분포하며 조성적인 차이로부터 알칼리화강암, 미문상화강암, 흑운모화강암, 화강섬록암, 반상화강암 등으로 세분된다.^{16,17} 알칼리화강암은 주로 남산일대에 분포하며, 화강섬록암은 토함산을 구성하는 주요 암석이다. 또한 미문상화강암과 흑운모화강암 및 반상화강암은 선도산, 마석산, 삼태산 일대에 혼재하여 분포한다.

분황사 석탑은 총 9,708개의 표면부재로 구성되어 있으며, 기단부는 377개이고 탑신부와 옥개석은 8,823개이다. 또한 4개의 석수와 504개의 감실 구성암석으로 이루어져 있다. 각각은 안산암류, 화강암류, 응회암류 등의 여러 암석이 혼용되었으며, 이를 세분하면 탑신을 구성하는 암석은 생성과정이 조금씩 다른 여러 종류의 안산암류이고, 기단부와 감실은 산출상태가 다른 화강암류가 이용되었다. 사자상은 알칼리화강암과 응회암으로 이루어졌으며, 노반을 이루는 암석은 석영반암이다 (Figure 2A, 2B, 2C).

이 중에서 탑의 주요 구성암석인 안산암질암과 화강암류를 박편으로 제작하여 편광현미경을 관찰하였다. 안산암질암은 입도가 불규칙한 반자형의 사장석과 완전 타형의 세립질 석영 및 미정질의 흑운모와 각섬석으로 구성되어 있는 괴상 석영안산암이 주류를 이룬다. 또한 반자형의 반정질 사장석과 석영, 암편 및 응회질 석기로 구성된 안산암질 응회암이 있다 (Figure 2D, 2E). 이들은 모두 강한 변질과 풍화작용에 의하여 장석류는 입자의 경계와 쌍정면을 따라 점토광물로 교대되어 있으며, 각섬석과 흑운모는 벽개면을 따라 녹니석화 작용을 받았다.

이 탑의 기단부와 감실 및 인왕상을 구성하고 있는 대표적인 암석인 알칼리화강암은 주로 등립질 입상조직을 가지며 파동소광을 하는 석영과 퍼사이트화된 알칼리 장석 및 흑운모가 주류를 이룬다. 부분적으로 석영과 장석

이 서로 교대하여 미문상 조직을 갖는 경우도 있다 (Figure 2F). 이 중에 알칼리 장석은 견운모화 또는 점토광물로 되어 있다. 유색광물로는 미량의 각섬석과 흑운모가 관찰되며 역시 변질이 심하다.

전암 대자율은 암석의 전체 자화강도를 구분하기 위해 응용된 암석연구의 한 수단이다. 대자율은 지구의 자기장에 대한 자화강도를 의미하며 암석의 자기적 특성을 결정하는 상수이다. 이 값은 진공에서 $k = 0$ 이며, 일반적인 화강암의 평균 대자율은 $2.512(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 이다. 석탑을 이루는 주요 부재인 기단의 화강암류와 탑신을 구성하는 안산암류로 나누어 대자율을 측정하였다 (Figure 3). 기단부를 보면 화강암의 경우 0.04에서 $21.2(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 범위를 보이는데, 이는 여러 화강암류가 혼재되어 사용이 되었기 때문이다. 탑신을 구성하는 안산암의 대자율 측정값의 범위는 $14.6\sim 39.9(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 로서 역시 다양한 종류의 안산암류가 혼용되었다는 것을 지시한다.

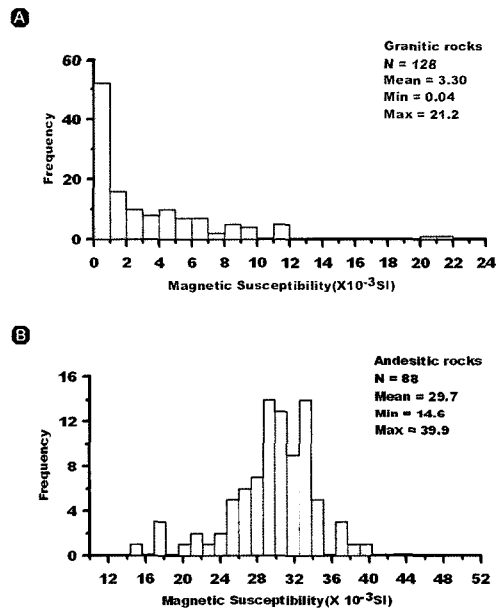


Figure 3. Magnetic susceptibility of rock properties in granitic rocks. (A) and andesitic rocks (B) for the stone pagoda in the Bunhwangsa temple.

3.2. 광물학적 및 화학적 특성

이 석탑의 주변에 탈락되어 있는 암석 중에 석탑과 동일한 암종을 선택하여 X-선 회절분석(Fig 4)과 주성분 원소를 분석하였다(Table 1). 앞에서 설명한 바와 같이, 탑신부와 옥개석을 이루고 있는 안산암질암은 주로 석영, 안산암질 응회암 및 현무암질암으로 구성되어 있다. X-선 회절분석 결과, 이들의 주요 조암광물은 사장석이며 소량의 석영과 정장석이 검출되었다. 또한 미량의 스멕타이트와 녹니석이 포함되어 있다. 알칼리화강암과 미분상화강암의 조암광물은 석영, 정장석, 사장석 및 흑운모 등이며 미량의 각섬석과 녹니석이 검출되었다(Fig 4). 석수를 이루고 있는 유문암질 응회암에서는 석영과 사장석 및 녹니석이 검출되었으며, 콘크리트는 시멘트에 석영과 사장석 및 정장석을 첨가하여 성형한 것으로 나타났다.

일반적으로 암석의 풍화단면에서 화학적 풍화작용의 진행정도를 측정하는 방법으로는 주원소의 분석결과를 이용하여 계산하는 풍화지수(CIA)와 풍화잠재지수(WPI)로 나타낸다(Table 1). 화학적 풍화지수는 유동성이 작은 Al_2O_3 에 대한 알칼리 원소의 변화를 나타내는 지수로서, 풍화작용이 진행되면서 유동성이 작은 Al_2O_3 는 시료에 잔류하고 있는 반면에 칼크-알칼리 계열의 원소들은 용액에 녹아 쉽게 유실됨으로서 풍화지수는 커진다.

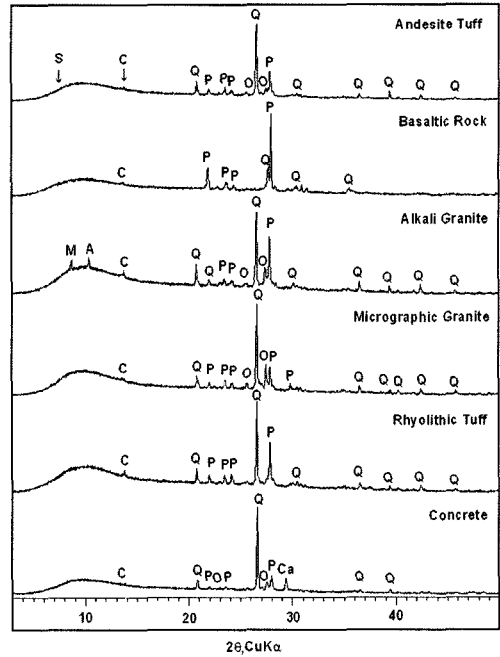


Figure 4. X-ray powder diffraction patterns showing host rocks of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple. (C: chlorite, A: amphibole, Q: quartz, P: plagioclase, M: mica, O: orthoclase, S: smectite, Ca: calcite).

다. 따라서 이 지수 값이 클수록 풍화작용이 많이 진행되었음을 시사한다.¹⁸ 분황사석탑을 구성하는 암석의 경우

Table 1. Major element contents (wt. %) for rock properties of stone pagoda in the Bunhwangsa temple.

No.	BH-1	BH-7	BH-10	BH-11	BH-5	BH-12	BH-14
Rock names	Basaltic rock	Andesitic rock	Andesitic tuff	Rhyolitic tuff	Graphic granite	Alkali granite	Concrete
SiO ₂	57.92	67.79	70.34	76.23	76.76	76.06	59.32
Al ₂ O ₃	18.16	15.59	14.4	12.98	12.57	11.65	9.90
Fe ₂ O ₃	7.28	3.64	2.83	1.58	1.15	2.66	2.20
MnO	0.13	0.12	0.15	0.03	0.02	0.07	0.06
MgO	2.11	0.64	0.63	0.10	0.09	0.02	0.63
CaO	5.30	3.09	2.01	0.65	0.16	0.29	11.04
Na ₂ O	3.91	2.87	4.54	4.20	3.57	4.28	2.30
K ₂ O	1.68	3.54	2.41	3.64	4.51	4.32	2.88
TiO ₂	0.76	0.73	0.47	0.15	0.16	0.12	0.28
P ₂ O ₅	0.31	0.18	0.16	0.04	0.08	0.03	0.08
LOI	1.99	0.65	1.28	0.50	0.88	0.65	11.04
Total	99.55	98.84	99.21	100.1	99.96	100.15	99.74
CIA*	50.38	52.38	51.19	51.90	53.23	48.76	26.85
WPI**	8.28	8.14	5.35	6.07	4.06	5.57	-24.17

Fe₂O₃ : total FeO, LOI : loss-on-ignition, CIA* : chemical index of alteration, WPI** : weathering potential index.

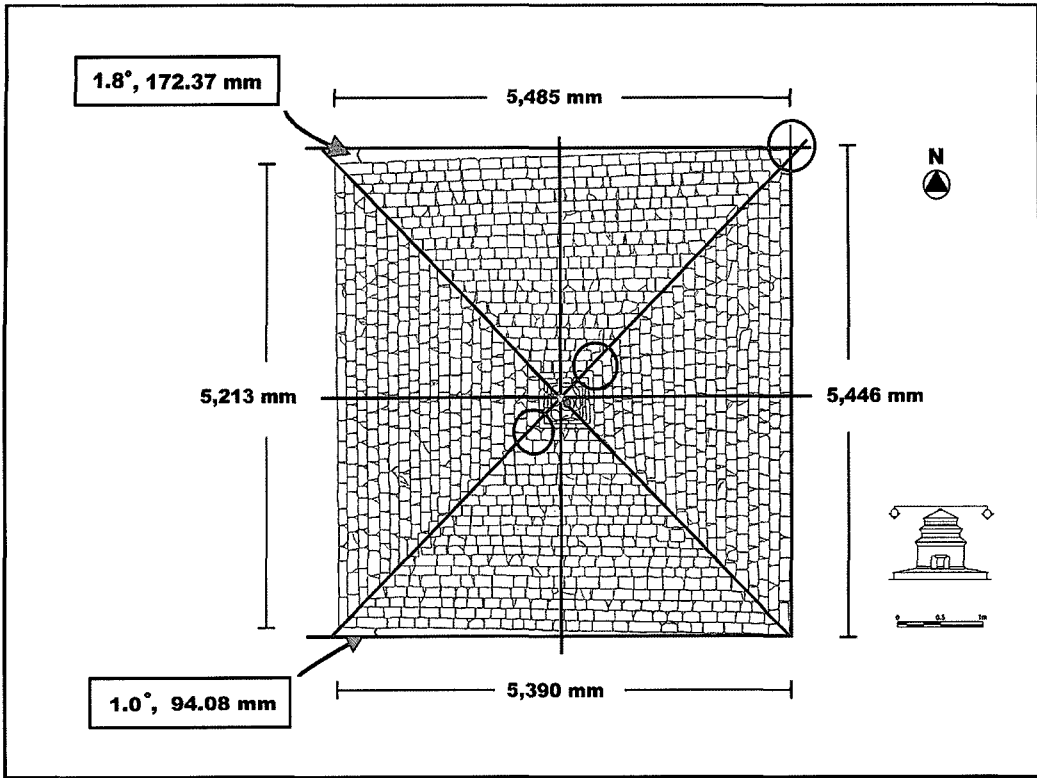


Figure 5. Detailed measurement of structural instabilities in the uppermost 3rd roof floor of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple.

현무암질암은 50.38, 안산암질암은 52.38, 안산암질 응회암은 51.19, 미문상 화강암은 53.23으로 높은 풍화지수를 나타내고 있다.

풍화잠재지수는 전체원소에서 알칼리 및 칼크-알칼리 원소의 상대적 비를 기준으로 0보다 높은 값을 보일수록 잠재능력이 크다는 것을 의미한다. 각각의 풍화 잠재지수는 현무암질암 8.28, 안산암질암 8.14, 안산암질 응회암 5.35, 유문암질 응회암 6.07, 미문상화강암 4.06, 알칼리화강암 5.57로 나타났다. 이는 모든 부재들이 왕성한 화학적 풍화잠재력을 가지고 있는 것을 의미한다. 이 중에서 현재 풍화작용에 가장 민감한 부재는 현무암질암이라는 것을 알 수 있다.

4. 풍화훼손도 평가

4.1. 구조적 불안정

모든 석조문화재의 구조적 불안정은 주로 지반의 영향을 받았다. 전탑이나 모전석탑의 표면 훼손에 가장 큰 문제는 전반적으로 나타나는 채색변질과 기단부의 균열 및 탈락이다. 이는 탑의 구조적 문제와도 관련이 있다. 이 탑들이 오랫동안 보존되지 못하고 일부만 전승되는 이유는 붕괴에 의한 유실의 가능성이 크다는 것이다. 특히 대부분의 탑들이 흙이나 잡석을 다져 기단을 마련한 다음 그 위에 탑이 세워져 있어 지반의 불안정에 상당한 영향을 끼치고 있다.¹⁹⁾

분황사석탑 역시 전석을 쌓아 올린 탑으로, 기단부는 수리 당시 화강암류의 부재들 사이에 시멘트와 콘크리트를 채워 보강하였다. 기단부의 위로는 화강암 부재로 감

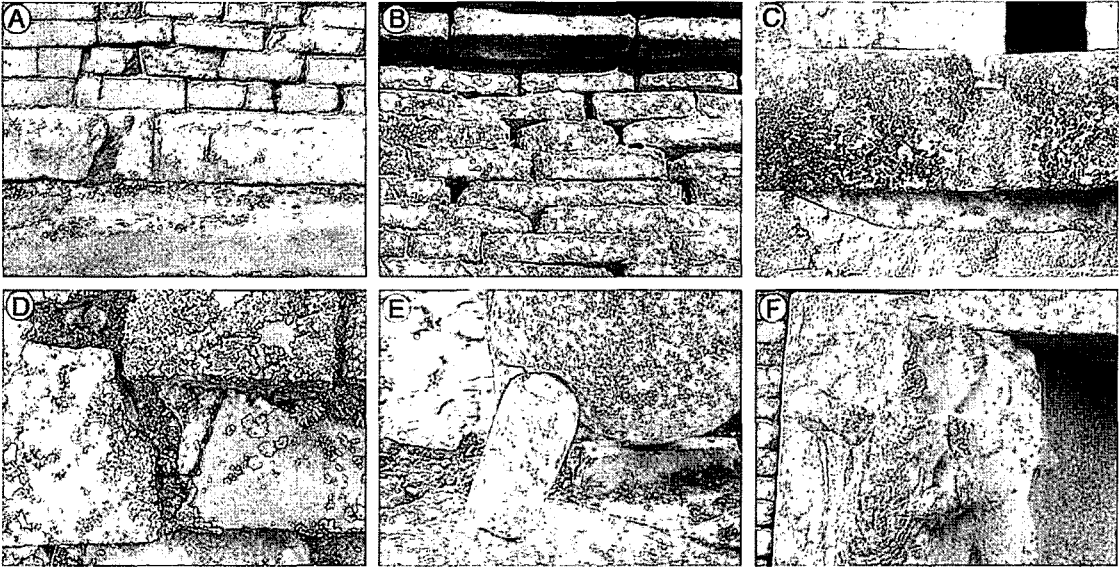


Figure 6. Fractures and cracks showing host rocks of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple. (A) Sheeting exfoliations developed in the basement rock materials. (B) Highly weathered andesitic rock surface coated with white grey crusts due to the dust and air pollutants. (C) Stylobate and tabernacle altered with discolorations and exfoliations. (D) Andesitic rock materials on the uppermost 3rd roof are severely deteriorated by weathering processes. (E) Stone lion broken with a right leg. (F) Stone tutelary and beast statues show partly falling off and fracture along the marginal parts.

실을 구성하고 전석을 올려 탑을 완성했으나 탑신부와 감실을 중심으로 구조적 불균형을 보이고 있다. 동쪽 감실문은 균열이 발생되어 있으며, 서쪽 1층 탑신부의 중앙은 돌출되어 있으며 이를 따라 균열대가 형성되어 있다. 북쪽 감실은 상단부가 돌출되어 있어 안정감을 해치고 있다. 남쪽 감실은 인왕상이 파괴되어 있으며 부재들의 왜곡이 아주 심하다.

이와 같은 구조적 불안정을 이미 조사된 분황사석탑의 실측도를 이용하여 평가하였다. 이 중에서 부재의 왜곡이 심한 3층 옥개석의 평면도를 대상으로 기하학적 문제점을 규명하였다(Fig 5). 이 평면도의 각 모서리 끝을 선으로 연결하면 만나는 중심점과 현재 노반이 있는 중심점이 어긋나 있는 것을 알 수 있다. 또한 수평 수직방향으로 수선을 만들어 보면 남동쪽과 북동쪽에서 이격각도가 나타난다. 이격각도는 북동쪽의 경우 1.8° 로 이를 길이로 나타내면 127.37 mm이다. 남동쪽은 1.0° 에 94.08 mm의 이격 거리를 가지는 것을 알 수 있다. 이는 탑의 중심 부근에서 발생한 부동침하로 인해 부재의 왜곡이 발생하였기 때문으로 보인다.

4.2. 물리적 풍화훼손도

분황사석탑은 외관상 부재의 파손과 균열이 심각한 것으로 보이지 않으나, 기단부와 감실을 이루는 부재들에서는 표면박리와 박락이 진행 중인 것을 관찰할 수 있으며 전석의 모서리 마모도 함께 나타난다(Figure 6). 안산암질암으로 구성된 전석은 부분적으로 일부편의 결실과 균열이 관찰되며 옥신을 이루는 전석은 풍화훼손 상태가 심각하다(Figure 6A, 6B). 대부분의 옥개를 이루는 전석은 표면박리와 박락이 심각하며 균열 및 탈락과 결실이 관찰된다(Figure 6C, 6D). 기단부의 네 모서리에 위치한 사자상은 표면풍화가 심하게 진행되었으며, 일부 편은 수지와 벌적으로 집합되어 있다(Figure 6E). 또한 네 방위의 감실 입구에 위치한 인왕상의 일부는 부재의 외각을 따라 결실 및 탈락과 표면풍화가 나타나 있다(Figure 6F).

Table 2와 3은 분황사 석탑의 전체 표면부재 개수 중, 균열과 탈락이 발생된 부재의 수와 전체부재에 대한 점유율을 나타낸 것이다. 부재의 수에 대한 기준은 균열은

Table 2. Total numbers and percentages of fractured rock properties of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple.

Division	conditions	counts of construction materials (%)				Total (%)
		East	West	South	North	
3rd roof rocks	fractured	72(23.7)	120(41.8)	61(19.7)	75(24.2)	328(27.1)
	total blocks	304(100)	287(100)	309(100)	310(100)	1210(100)
3rd underpinning	fractured	11(12.4)	7(7.8)	15(14.9)	8(8.6)	41(11.0)
	total blocks	89(100)	90(100)	101(100)	93(100)	373(100)
3rd body rocks	fractured	14(12.0)	12(8.2)	19(12.8)	11(7.0)	56(9.8)
	total blocks	117(100)	146(100)	148(100)	158(100)	569(100)
2nd roof rocks	fractured	25(8.3)	12(4.2)	26(8.8)	20(6.6)	83(7.0)
	total blocks	302(100)	284(100)	293(100)	305(100)	1184(100)
2nd underpinning	fractured	12(7.8)	22(17.6)	14(9.1)	20(13.3)	68(11.7)
	total blocks	153(100)	125(100)	154(100)	150(100)	582(100)
2nd body rocks	fractured	20(13.2)	19(13.0)	28(19.6)	14(8.5)	81(13.4)
	total blocks	151(100)	147(100)	143(100)	165(100)	606(100)
1st roof rocks	fractured	24(7.3)	16(5.4)	39(13.3)	19(6.8)	98(8.2)
	total blocks	331(100)	299(100)	293(100)	279(100)	1202(100)
1st underpinning	fractured	13(7.8)	14(10.2)	29(20.1)	8(4.8)	64(10.4)
	total blocks	167(100)	137(100)	144(100)	167(100)	615(100)
1st body rocks	fractured	63(10.5)	72(12.6)	68(10.5)	30(4.5)	233(9.4)
	total blocks	602(100)	571(100)	645(100)	664(100)	2482(100)
Tabernacle	fractured	1(16.7)	2(33.3)	3(50)	1(16.7)	7(29.2)
	total blocks	6(100)	6(100)	6(100)	6(100)	24(100)
Basement floor	fractured	1(1.0)	0(0)	0(0)	0(0)	1(0.3)
	total blocks	99(100)	77(100)	102(100)	99(100)	377(100)
Stylobate	fractured	2(1.3)	3(3.0)	4(3.7)	2(1.7)	11(2.3)
	total blocks	154(100)	102(100)	109(100)	115(100)	480(100)
The stone lion	fractured	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	total blocks	1(100)	1(100)	1(100)	1(100)	4(100)
Total (%)	fractured	258(11.6)	299(14.3)	306(13.7)	208(9.1)	1071(11.0)
	total blocks	2476(100)	2272(100)	2448(100)	2512(100)	9708(100)

육안으로 가능한 크고 작은 균열이며, 탈락부재는 1/4 이상 탈락된 부분을 가진 것이다. 계수분석 결과, 분황사 석탑을 이루는 총 표면 부재의 수는 9,708개이며, 동쪽의 총 표면부재 개수는 2,216개, 서쪽은 2,086개, 남쪽은 2,230개, 북쪽은 2,291개로 비슷하지만 서쪽의 표면 부재 수가 가장 적다는 것을 알 수 있다. Table 2를 보면, 석재 중에서 균열된 부재가 가장 많은 부분은 3층 옥개의 낙수면이며 동쪽, 서쪽 및 북쪽의 균열 부재수가 많다. 또한 서쪽면의 2층 탑신과 1층 옥개받침에서는 균열 부재의 점유율이 각각 19.6%, 20.1%로 가장 많은 것을 알 수 있다.

탈락된 부재수를 정리한 Table 3에서, 가장 많은 탈락 부재수를 가지고 있는 곳은, 3층 옥개의 낙수면으로 동쪽 부재의 경우 전체 표면부재의 18.1%, 서쪽 부재는

16.4%, 남쪽 부재는 17.5%, 북쪽에서는 21.0%의 점유율을 갖는다. 이와 같이 균열과 탈락된 부재는 후에 석탑의 구조적 불안정을 야기할 수 있으며 떨어져 나온 편들도 안전상의 문제를 야기시킬 수 있다. 또한 균열이나 탈락된 부재의 틈 사이는 식물의 포자나 먼지 등이 유입되어 암석의 풍화를 촉진시킬 수 있다. 따라서 이 석탑에서 발생한 표면풍화에 의한 석재의 기능저하와 부재의 결실, 탈락 등에 대하여는 다양한 임상실험을 통한 접합, 교체 및 보강작업 등의 과학적 복원이 필요할 것으로 판단된다.

4.3. 무기오염물질의 훼손

석조문화재의 화학적 풍화과정에는 주로 분해, 용해,

Table 3. Total numbers and percentages of falling off rock properties of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple.

Division	conditions	counts of construction materials (%)				Total (%)
		East	West	South	North	
3rd roof rocks	fall out	55(18.1)	47(16.4)	54(17.5)	65(21.0)	221(18.3)
	total blocks	304(100)	287(100)	309(100)	310(100)	1210(100)
3rd underpinning	fall out	5(5.6)	3(3.3)	10(9.9)	8(8.6)	26(7.0)
	total blocks	89(100)	90(100)	101(100)	93(100)	373(100)
3rd body rocks	fall out	16(13.7)	14(9.6)	4(2.7)	7(4.4)	41(7.2)
	total blocks	117(100)	146(100)	148(100)	158(100)	569(100)
2nd roof rocks	fall out	14(4.6)	14(5.0)	8(2.7)	9(3.0)	45(3.8)
	total blocks	302(100)	284(100)	293(100)	305(100)	1184(100)
2nd underpinning	fall out	10(6.5)	10(8)	6(3.9)	14(9.3)	40(6.9)
	total blocks	153(100)	125(100)	154(100)	150(100)	582(100)
2nd body rocks	fall out	12(8.0)	14(9.5)	9(6.3)	10(6.1)	45(7.4)
	total blocks	151(100)	147(100)	143(100)	165(100)	606(100)
1st roof rocks	fall out	16(4.8)	17(5.7)	16(5.5)	23(8.2)	72(6.0)
	total blocks	331(100)	299(100)	293(100)	279(100)	1202(100)
1st underpinning	fall out	14(8.4)	9(6.6)	19(13.2)	5(3.0)	37(6.0)
	total blocks	167(100)	137(100)	144(100)	167(100)	615(100)
1st body rocks	fall out	35(5.8)	15(2.6)	30(4.7)	22(3.3)	102(4.1)
	total blocks	602(100)	571(100)	645(100)	664(100)	2482(100)
Tabernacle	fall out	0(0)	2(33.3)	1(16.7)	0(0)	3(12.5)
	total blocks	6(100)	6(100)	6(100)	6(100)	24(100)
Basement floor	fall out	0(0)	1(1.3)	0(0)	0(0)	1(0.3)
	total blocks	99(100)	77(100)	102(100)	99(100)	377(100)
Stylobate	fall out	5(3.2)	3(3.0)	4(3.7)	2(1.7)	14(3.0)
	total blocks	154(100)	102(100)	109(100)	115(100)	480(100)
The stone lion	fall out	2(200)	1(100)	0(0)	2(200)	5(125)
	total blocks	1(100)	1(100)	1(100)	1(100)	4(100)
Total (%)	fall out	184(8.3)	150(7.2)	151(6.8)	167(7.3)	652(6.7)
	total blocks	2476(100)	2272(100)	2448(100)	2512(100)	9708(100)

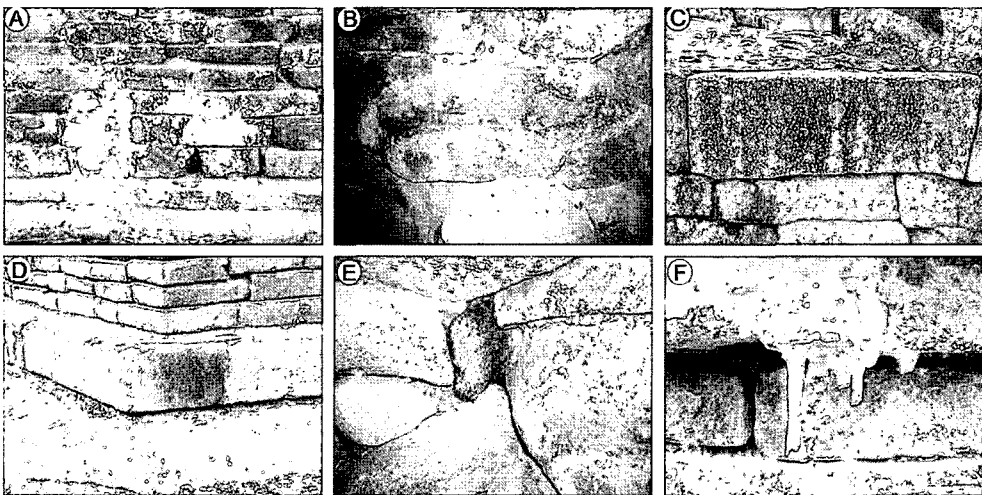


Figure 7. Secondary contaminants of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple. (A) Grey precipitates coated cement mortar composed of calcite, gypsum and clay minerals. (B) Reddish brown precipitates by iron hydroxides occurred with the basement and inside of the tabernacle. (C) Dark brown contaminants coated basement rocks. (D) Black contaminants and reddish brown precipitates occurred the basement of body rocks. (E) Reddish brown precipitates by iron hydroxides occurred with the basement and inside of the tabernacle. (F) Stalactite-like white grey precipitates formed boundary between the rock materials.

Table 4. Total numbers and percentages of covered rock properties by light gray precipitates of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple.

Division	conditions	counts of construction materials (%)				Total (%)
		East	West	South	North	
3rd roof rocks	precipitates	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	total blocks	304(100)	287(100)	309(100)	310(100)	1210(100)
3rd underpinning	precipitates	9(10.1)	15(16.7)	27(26.7)	11(11.8)	62(16.6)
	total blocks	89(100)	90(100)	101(100)	93(100)	373(100)
3rd body rocks	precipitates	10(8.5)	22(15.0)	15(10.1)	15(9.5)	62(10.9)
	total blocks	117(100)	146(100)	148(100)	158(100)	569(100)
2nd roof rocks	precipitates	2(0.7)	5(1.8)	2(0.7)	4(1.3)	13(1.1)
	total blocks	302(100)	284(100)	293(100)	305(100)	1184(100)
2nd underpinning	precipitates	18(11.8)	32(25.6)	25(16.2)	5(3.3)	80(13.7)
	total blocks	153(100)	125(100)	154(100)	150(100)	582(100)
2nd body rocks	precipitates	45(30.0)	21(14.3)	22(15.4)	55(33.3)	143(23.6)
	total blocks	151(100)	147(100)	143(100)	165(100)	606(100)
1st roof rocks	precipitates	4(1.2)	3(1.0)	3(1.0)	5(1.7)	15(1.2)
	total blocks	331(100)	299(100)	293(100)	279(100)	1202(100)
1st underpinning	precipitates	12(7.2)	8(5.8)	35(24.3)	44(26.3)	99(16.1)
	total blocks	167(100)	137(100)	144(100)	167(100)	615(100)
1st body rocks	precipitates	50(8.30)	42(7.4)	33(5.1)	75(11.3)	200(8.1)
	total blocks	602(100)	571(100)	645(100)	664(100)	2482(100)
Total (%)	precipitates	150(6.8)	148(7.1)	162(7.3)	214(9.3)	674(7.0)
	total blocks	2476(100)	2272(100)	2448(100)	2512(100)	9708(100)

수화, 가수분해, 산화환원, 탄산화 및 킬레이트화 작용 등이 있으나, 대부분은 서로 복합적으로 작용하여 암석을 파괴한다.^{20,21} 분황사 석탑의 전석 사이에서는 회백색 침전물질이 중유석과 같이 생성되어 있으며, 부재 표면에 넓게 분포되어 있기도 하다(Figure 7A). 이는 염산반응 정도로 보아 방해석이 주성분 광물로 보이며, 석고 및 수화석으로 보이는 다른 백색 침전물과 공존한다.

이외에도 피각상을 이루는 백색 침전물이 있으나 이는 암석의 풍화작용에 의해 생성된 점토광물로 판단된다. 이 침전물들은 관람객이 생성시키는 먼지와 함께 부착되어 있는 경우도 있다. 또한 이 석탑의 감실 내부에는 강수의 유동흔적을 따라 생성된 탄산염 광물의 백화현상과 황갈색 침전물 등이 어울려 표면 오염을 형성하였다(Figure 7B). 회백색 침전물이 탑신의 북쪽면에서 우세한 반면 동쪽과 서쪽의 탑신을 구성하는 전석의 표면과 남쪽면의 배래석, 네 면의 기단석에는 암흑색의 침전물도 생성되어 있다. 이는 고사된 생물체로 인한 피복과 구성 암석의 화학적 반응으로 인한 2차 침전물로 판단된다

(Fig 7C, 7D). 감실의 내부와 인왕상의 표면에서 황갈색 변색이 관찰되는데 주로 강수의 흐름을 따라 생성되어 있으며, 먼지와 토양 및 회백색 침전물과 함께 피복되어 있다(Fig 7E, 7F).

이 탑에서 백화현상이 나타난 표면 부재의 수와 점유율을 표로 종합하였다(Table 4). 오염부재의 수에 대한 기준은, 한 부재에서 회백색 침전물이 1/3 이상 덮여 있는 것을 합산한 것이다. 이 탑의 모든 부분 중에서 백화현상이 심각한 위치는 2층과 3층의 옥개받침 부분으로, 오염부재의 점유율은 각각 26.7%와 25.6% 정도이며, 2층 탑신은 전체 표면 부재의 33.3%로 가장 심한 것으로 나타났다.

방위별로 살펴보면, 2층 옥개석과 3층 옥개석 부분에서 발생한 백화현상은 서쪽면과 남쪽면이 심각한 것에 반해 1층 옥개석과 1층 탑신, 2층 탑신은 북쪽이 월등하게 높은 것을 알 수 있다. 또한 동쪽에서 나타난 백화현상의 경우, 다른 부재보다 2층 탑신 부분이 30%로 높다. 이를 종합해볼 때, 동쪽과 북쪽면이 다른 방위보다

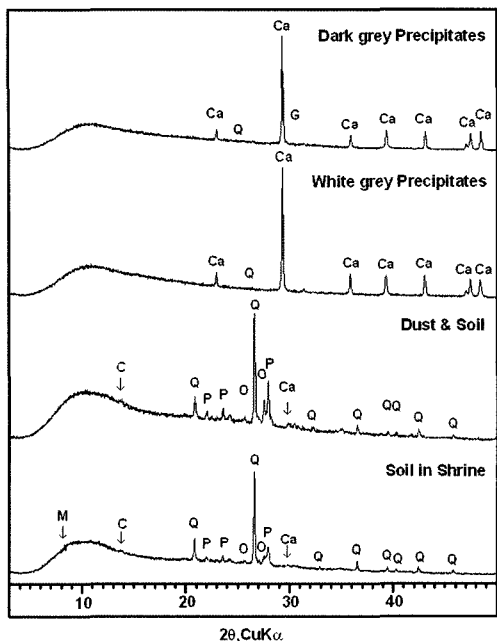


Figure 8. X-ray powder diffraction patterns showing secondary contaminants of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple. M: mica, C: chlorite, Q: quartz, Ca: calcite, G: gypsum, P: plagioclase, O: orthoclase.

백화현상이 더 많이 발생되었다는 것을 알 수 있다. 이는 상대적으로 누수 면적이 넓으며 수분 유지시간이 길었기 때문인 것으로 해석된다.

회백색 침전물을 색도에 따라 분류하여 X-선 회절분석을 실시한 결과, 색의 차이에 관계없이 주로 방해석으로 구성되어 있으며 미량의 석고가 검출되었다(Figure 8). 이는 전자현미경 사진을 통해서도 확인 할 수 있다. 알칼리화강암의 내부는 조암광물과 풍화과정에서 생성된 카오리나이트가 자생하였으며(Figure 9A), 풍화된 안산암에서는 사장석과 흑운모가 분해되어 점토광물을 만들었다(Figure 9B).

각 면의 탐신부와 옥개석의 하단에서는 피각상으로 이루어진 침전물과 종유석처럼 생성된 회백색의 화합물을 쉽게 볼 수 있다. 이를 주사전자현미경으로 촬영한 결과, 방해석과 석고가 점토광물과 함께 형성되어 있는 것을 알 수 있다(Figure 9C, 9D). 한편 Figure 9E, 9F는 석수를 구성하는 응회암에서 탈락된 시료를 주사전자현미경으로 촬영한 것으로, 주상과 침상의 불석광물들이 자형을 이루어 광물의 입간에서 성장한 것을 볼 수 있다.

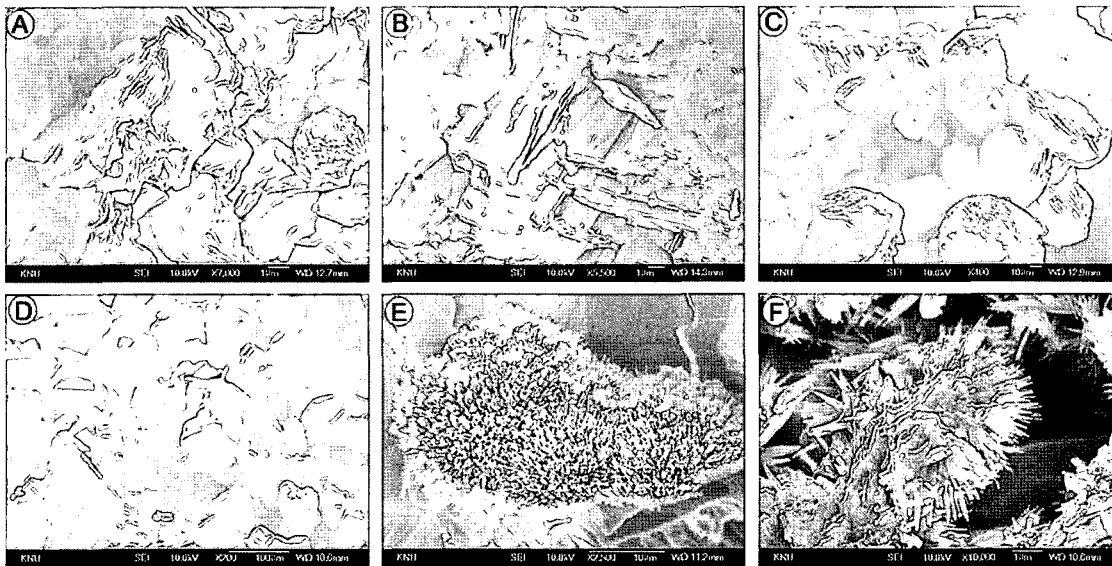


Figure 9. Scanning electron microphotographs showing secondary minerals and precipitates of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple. (A) Kaolinitic clay minerals formed with alkali feldspar of granitic rock. (B) Highly eroded biotite and plagioclase the andesitic rock. (C, D) Euhedral calcite and gypsum in the white grey precipitates formed rock surface. (E, F) Fibrous acicular zeolitic clay minerals from the rhyolitic lithic tuff within the stone lion.

Table 5. Summary on deterioration degree from all sides the rock properties of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple.

	fractured blocks (%)	fall out blocks (%)	precipitates blocks (%)	Total blocks (%)
East	258(11.6)	184(8.3)	150(6.8)	2476(100)
West	299(14.3)	150(7.2)	148(7.1)	2272(100)
South	306(13.7)	151(6.8)	162(7.3)	2448(100)
North	208(9.1)	167(7.3)	214(9.3)	2512(100)
Mean	267.8(12.2)	163(7.4)	168.5(7.6)	2427(25)
Total	1071	652	674	9708

4.4. 유기오염물의 오염

유기물은 토양층에서 중요한 발생학적 요인을 구성할 뿐 아니라, 암석의 분해와 풍화작용에 아주 중요한 부분을 차지한다. 또한 미생물의 경우, 석조문화재의 표면에 부착하여 번식하게 될 때 그 표면에서는 미생물의 영양원이 될 수 있는 유기화합물의 변화가 초래된다. 이 과정에서는 미생물의 종류에 따라 그들의 에너지원 및 요구 무기영양염이 다르다는 이유로 다양한 환경변화를 축적시키게 된다.²²

이 석탑의 옥개 낙수면을 이루는 전석에는 지의류, 선태류 및 초본 식물들의 침입이 있다. 특히 전석 사이를 충전한 시멘트 집착물질과의 경계부에서는 초본식물들의 활착이 왕성하다. 또한 부재의 곳곳에는 거미와 개미집이 산재하며, 먼지와 같은 대기 오염물질들의 피복도 심각하다. 기반부의 암석도 지의류와 선태류에 의한 피복 오염이 심하며, 낙수면의 콘크리트와 석재를 충전한 곳에서는 고등식물의 침입과 선태류가 밀생한다. 감실 입구의 인왕상에는 조류의 피해가 가장 심한 곳으로 녹색, 황갈색, 흑색 등의 조류가 균집을 이뤄 표면에 피복되어 있다.

이 탑에서 지의류에 의한 풍화가 가장 심한 곳은 사자상으로 각각의 사자상에는 공통적으로 고착지의류, 엽상지의류, 선태류, 조류 및 균류의 오염이 심하다. 주변 탑재에는 초본식물도 성장하고 있어 생물학적 피해가 우려된다. 감실 내부에서는 육안으로도 녹색, 흑색, 황갈색의 변색을 관찰할 수 있는데, 이는 강수로 인해 이 부분이 늘 습한 환경을 유지하고 있다는 증거이다. 이와 같은 분황사석탑의 이차적 유기오염 현상과 피복 생물종 및 보존과학적 검토는 차후에 상세히 보고할 예정이다.

5. 보존과학적 고찰

석조문화재는 다른 재질의 문화재에 비해 내구성의 측면에서 유리하지만 열, 물, 대기, 생물 등의 외부요인에 의해 풍화되거나 붕괴되는 경우가 발생한다. 석조문화재를 피해요인으로부터 보존하기 위해서는 먼저 훼손 원인이나 재질 변화를 과학적으로 규명하는 것이 중요하다. 특히 오랜 시간동안 외부에 노출되어 있는 석조문화재는 물리화학적 및 생물학적, 환경적 영향 등의 다양한 요인들에 의해 재질의 풍화가 가속되어 있다. 또한 대기 오염물질 등이 함께 암석 내부에 침투되어 있어 보존처리가 힘들다.

특히 석탑이나 전탑의 경우는 암석의 종류가 다른 여러 부재를 쌓아 만든 것이기 때문에 오랜 시간이 지나면 구조적 불균형까지 발생할 수 있다. 또한 부재의 틈 사이에 침투한 오염물이나 침전물 및 생물들로 인해 풍화의 진행 속도가 촉진되어 시급한 보존 처리를 필요로 한다.²³ 분황사 석탑에서 각각의 방위별 훼손현상을 종합하면, 균열부재는 동쪽과 서쪽, 남쪽이 비슷한 비율로 나타났지만 북쪽의 경우 9.1%로 다른 방향보다 피해가 적다. 탈락된 부재는 네 면이 비슷한 점유율을 보이며, 백화현상도 비슷한 점유율을 보이지만 북쪽이 다른 방위보다 조금 높다(Table 5). 따라서 북쪽면이 균열이나 탈락의 피해가 적은 반면 백화현상으로 인한 피해가 크다는 것을 지시한다. 이는 북쪽면이 다른 방위보다 햇볕에 대한 노출이 적은 편이며, 상대적으로 수분의 유지 시간이 길어 이차 오염물질의 생성에 유리했기 때문으로 해석된다.

이 석탑의 풍화현상은 여러 원인이 복합적으로 작용한 결과다. 가장 중요한 문제는 개축 이후 발생한 것으로

추정되는 구조적 불안정에서 야기된 불균형과 이에 수반되는 암석의 균열이다. 또한 강수, 눈, 안개 등에 의해 암석의 화학적 풍화와 광물의 분해, 부재의 박리현상에 따른 차별풍화, 모서리 마모와 미세균열, 조류, 지의류 및 초본식물 등에 의한 생물학적 풍화 등이 많이 관찰된다. 이차적인 것으로는 감실 내부로 스며든 강수로 인하여 부재의 표면이 이차 침전물로 피복된 현상, 개축 시 기단 상부의 틈을 메운 시멘트 몰탈에 의한 부식과 탑신의 표면에 발생된 백색의 침전물의 피복 등 여러 가지가 들 수 있다.

이 석탑에서 가장 필요한 보존처리는 균열, 박리, 박락 및 결실된 부재의 접합처리와 구조적 불안정을 야기하는 부재의 강화처리, 석탑 표면의 부착된 흑색과 백색의 이차 침전물 제거 및 석탑의 표면에 착생하는 생물들의 제거이다. 이와 같은 일반적인 보존처리는 국내외에서 보고된 석조문화재의 사례연구를 지침으로 분황사 석탑의 경우에 응용할 수 있을 것이다. 그러나 보존처리에 앞서 분황사 석탑이 가지고 있는 부재별 특성과 풍화상태의 정밀진단이 선행되어야 하며, 이 결과를 바탕으로 신중한 복원이 진행되어야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

1. 이 탑의 부재는 여러 종류의 암석이 혼용되었으며, 전반적인 사이트 환경은 양호하나 보호시설이 없어 관광객의 영향을 직접적으로 받는다. 전체적으로 보아 대기 오염물질의 피해가 심하며, 탑의 북동쪽은 백화현상이 남서쪽은 부재의 균열이 심각하다. 이 석탑의 총 표면부재 수는 9,708개로서 균열된 부재는 11.0%, 압편탈락 부재는 6.7%, 이차오염물질로 피복된 부재는 7.0%의 점유율을 보인다.
2. 모전석을 이루는 암석은 주로 안산암질암이나 아주 다양한 성인을 갖는다. 탑신과 옥개를 이루고 있는 전석은 부분적으로 모서리 마모와 균열이 발생된 것을 제외하면 비교적 풍화와 훼손에 안정한 상태로 보인다. 그러나 옥개의 전석은 다층박리와 박락, 양파껍질과 같은 분해 및 구열상 균열과 압편상 탈락이 진행 중이다.
3. 탑신의 전석사이에서는 회백색 침전물질이 종유석

과 같이 생성되어 있다. 여기에는 방해석이 주성분 광물이며 석고와 점토광물이 포함되어 있다. 이 백색침전물의 분포는 북동쪽에 우세하게 발생되어 있으며, 특히 동쪽 1층과 2층의 탑신부 및 북쪽의 탑신부가 가장 심하다. 이 침전물들은 관람객이 생성시키는 먼지와 함께 부착되어 있다.

4. 기단부의 암석은 대부분 화강암질암으로서 지의류와 이끼류에 의한 피복오염이 심하며, 부분적으로 암흑색 및 황갈색 이차 산화물에 의한 무기오염물도 관찰된다. 특히 기단부의 콘크리트와 석재를 충전한 곳에서는 고등식물의 침입이 심각하다. 또한 기단부의 암석들은 모서리 마모와 탈락 및 입상 분해작용이 진행 중이며, 부분적으로 박리와 박락 및 균열이 발생되었다.
5. 이 석탑은 표면 풍화에 의한 석재의 기능 저하와 부재의 결실, 탈락 등이 심각하므로 임상 실험을 통한 전석의 일부 교체와 보강이 필요하다. 각 면의 감실을 이루고 있는 부재들은 대부분 화강암질암으로서 이격과 왜곡이 심하며 구조적 불안정을 나타내고 있다. 이와 같은 모든 훼손요인들은 정밀한 진단을 통한 보존처리가 필요하다.

참고문헌

1. 조선광문회, “동경잡기”, 권2, 4 (1992)
2. 문화재관리국, “분황사석탑 실측조사보고서”, 9-31 (1992).
3. J. Fidler, “Stone building, construction and associated component system: their decay and treatment”. *English Heritage Research Transactions*, 2, 1-104 (2002).
4. S. G. Lee and D. H. De Freitas, “A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea”. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 22, 31-43 (1989).
5. J. L. Drever and J. Zobrist, “Chemical weathering of silicate rocks as a function of elevation in the southern Swiss Alps”. *Geochemica et*

- Cosmochemica Acta*, 56, 3209-3216 (1992).
6. 양희제, 김사덕, 이찬희, 최석원, "익산 미륵사지 석탑의 해체과정과 구성부재의 훼손도 평가". *보존과학회지*, 16, 77-88 (2004).
 7. 김영택, 이찬희, 이명성, 이정은, 송치영, "진천 지암리 석조여래입상의 보존과학적 진단과 부재의 산지추정". *문화재과학기술*, 4, (2005).
 8. 이명성, 이정은, 표수희, 송치영, 이찬희, "논산 판축사 석등의 훼손도 진단 및 기원암의 성인적 해석". *보존과학회지*, 17, 5-18 (2005)
 9. 이찬희, 정연삼, 김지영, 이정은, "옥천 용암사 마애불의 거동특성 해석과 이차적 훼손". *보존과학회지*, 17, 83-94 (2005).
 10. C. H. Lee, S. W. Choi and M. Suh, "Natural deterioration and conservation treatment of the granite standing Buddha of Daejosa Temple". Republic of Korea, *Geotechnical and Geological Engineering*, 21, 63-77 (2003).
 11. C. A. Price, "Stone conservation. An overview of current research". *The Getty Conservation Institute*, (1996).
 12. 강우방, "분황사의 금강역사상, 분황사의 재조명". *신라문화제 학술발표회논문집*, 20, 199-217 (1999).
 13. 박경식, "분황사 모전석탑에 대한 고찰, 분황사의 재조명". *신라문화제 학술발표회논문집*, 20, 161-197 (1999).
 14. 문화재청, "문화재 상세정보, <http://www.ocp.go.kr/>, 분황사 석탑". *문화재청*, (2004).
 15. 강우방, 신용철, "탑", *술*, 120-126 (2003).
 16. 이준동, 황병훈, "경주 남산-토함산 일원의 화강암류에 관한 암석학적 연구". *한국지구과학회지*, 20, 80-95 (1999).
 17. 좌용주, 이상원, 김진섭, 손동운, "경주 불국사와 석굴암의 석조 건축물에 사용된 석재의 공급지에 대하여". *지질학회지*, 36, 335-340 (2000).
 18. H.W. Nesbitt and G.M. Young, "Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations". *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 48, 1523-1534 (1984).
 19. 이찬희, 최석원, 한경순, 원경식, "경주 서악동 삼존불입상의 기계적훼손과 보존과학적 접근". *지질학회지*, 37, 611-627 (2001).
 20. Nagano, T. and Nakashima, S., "Study of colors and degrees of weathering of granitic rocks by visible diffuse reflectance spectroscopy". *Geochemical Journal*, 23, 75-83 (1989).
 21. Sharma, A. and Rajamani, V., "Weathering of gneissic rocks in the upper reaches of Cauvery river, South India: Implications to neotectonics of the region". *Chemical Geology*, 166, 203-223 (2000).
 22. F.E.W. Eckhart, "Microorganisms and weathering of a sandstone monument". *Environmental Biochemistry and Geomicrobiology*. Vol 2, 675-686 (1978).
 23. 이정은, "경주 분황사 석탑의 보존과학적 진단과 부착생물종의 다양성". *공주대학교대학원 이학석사학위논문*, 87-94 (2005).